

新疆库拜盆地陆相锆石砂矿床锆石年代学特征与成矿物质来源

李益龙^{1,*}, 刘兵^{1,2,*}, 王国庆¹, 彭宇^{1,2}, 田少亭^{1,2}, 赵立民¹, 卢樱蓉¹, 韩煦¹, 周光颜¹, 刘崑国², 时显振²

1. 中国地质大学（武汉）地球与行星科学学院, 湖北 武汉 430074

2. 新疆维吾尔自治区地质局区域地质调查中心, 新疆 乌鲁木齐 830011

摘要: 新疆库拜盆地北缘宇海锆石砂矿床的发现, 首次在中国乃至世界范围内证实了陆相沉积盆地内可以形成世界级的锆石砂矿床, 为在全球范围内寻找同类型锆石矿床开辟了全新的思路 and 方向。本研究对该矿床的赋矿地层进行了详细的野外地质调查, 采集了代表性样品开展锆石结构、形貌、年龄和元素的综合分析。结果表明, 宇海锆石砂矿床的赋矿地层包括古-始新统库姆格列木群、渐新统阿瓦特组、中新统吉迪克组和康村组, 碎屑锆石均为近源沉积, 各个组均存在一个占统治地位的早二叠世年龄峰, 峰值年龄分别为 284 Ma、281 Ma、280 Ma 和 281 Ma。另有较弱的早古生代年龄峰在库姆格列木群和康村组出现, 分别为 456 Ma 和 448 Ma, 在阿瓦特组和吉迪克组中几乎不出现。库姆格列木群中还存在零星分布的元古宙锆石, 在其它组中几乎可以忽略。宇海锆石砂矿区新生代地层中占主导的二叠纪碎屑锆石源区以 A 型花岗质岩石为主, 来源于库拜盆地北缘的阔克沙勒岭晚古生代陆缘盆地发育的二叠纪碱性岩带, 古生代、元古宙碎屑锆石指示了极少量更北侧的石炭纪-古元古代地质体的物源供给。中生代地层的碎屑锆石则来源于阔克沙勒岭晚古生代陆缘盆地更北侧的东阿赖-哈尔克山古生代弧前增生带。这一锆石物源区的显著转换, 表明随着新生代南天山快速隆升, 造山带南缘阔克沙勒岭晚古生代陆缘盆地抬升剥蚀, 成为库拜盆地的主要物源供给区。其中的早二叠世碱性岩体是宇海锆石砂矿的主要成矿物质来源, 而中生代地层则没有作为再循环物质参与成矿。

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项项目“西南天山锆（铅）砂矿成矿规律及潜力评价”（No. 2025A03001-1）、新疆维吾尔自治区自然科学基金地质创新发展联合基金。

***第一及通讯作者简介:** 李益龙（1983-），男，教授，研究方向为岩石学与矿床学。ORCID: 0000-0003-2688-7634. E-mail: ylli@cug.edu.cn;

共同第一与共同通讯作者简介: 刘兵（1986-），男，高级工程师，主要从事资源勘查工作。ORCID: 0009-0007-9378-5191. E-mail: 33824790@qq.com.

关键词：陆相锆石砂矿；锆石年代学；物源分析；库拜盆地；西南天山

中图分类号：P618.85；

收稿日期：2026-7-16

Zircon geochronology and source analysis of the fluvial zircon placer deposit in the Kubai Basin, Xinjiang

Li Yilong^{1,*}, Liu Bing^{1,2,*}, Wang Guoqing¹, Peng Yu^{1,2}, Tian Shaoting^{1,2}, Zhao Limin¹, Lu Yingrong¹, Han Xu¹, Zhou Guangyan¹, Liu Weiguo², Shi Xianzhen²

¹ School of Earth and Planetary Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China

² Regional Geological Survey Center, Xinjiang Uygur Autonomous Region Bureau of Geology and Mineral Resources, Urumqi 830011, Xinjiang, China

Funding: This work was supported by the Major Science and Technology Special Project of the Xinjiang Uygur Autonomous Region (Metallogenetic regularity and potential evaluation of zircon (hafnium) sand deposits in the southwestern Tianshan mountain, No. 2025A03001-1) and the United Fund for Geological Innovation Development of the Xinjiang Natural Science Foundation.

First and Corresponding Author Profile: Li Yilong (ORCID: 0000-0003-2688-7634), Professor, School of Earth and Planetary Sciences, China University of Geosciences (Wuhan); Email: ylli@cug.edu.cn

Co-first and co-corresponding author: Liu Bing (ORCID: 0009-0007-9378-5191), Male, Senior Engineer, mainly engaged in resource exploration work. E-mail: 33824790@qq.com

Abstract: The discovery of the Yuhai zircon placer deposit in the northern margin of the Kubai Basin in Xinjiang has, for the first time in China and even globally, confirmed that world-class zircon placer deposits can form within continental sedimentary basins, opening up new ideas and directions for the search for similar zircon deposits worldwide. In this study, a detailed field investigation was conducted on the ore-bearing strata of this deposit, and representative samples were collected for systematic research on the structure, morphology, age, and elements of zircons. The research findings indicate that the sedimentary strata of the continental zircon placer deposit in the Kubai Basin include the Paleocene - Eocene Kumugeliemu Group, the Oligocene Awate

Formation, the Miocene Jidike Formation, and the Kangcun Formation. The detrital zircons are proximal sediments and reveal an Early Permian predominant peak at 284 Ma, 281 Ma, 280 Ma and 281 Ma for each group. The Kumugeliemu Group and the Kangcun Formation contain a secondary age peak at 456 Ma and 448 Ma respectively, which is absent in the Awate and Jidike Formations. A small number of Proterozoic records are present in the Kumugeliemu Group but almost absent in the other three formations. The dominated Permian detrital zircons in the Cenozoic strata were sourced from A-type granitic rocks from the northern Late Paleozoic alkaline rock belt in the Kuokeshaleling marginal basin belt. In contrast, the minor populations of Paleozoic and Proterozoic detrital zircons indicate limited sediment contributions from Carboniferous to Paleoproterozoic geological terranes located farther to the north. Detrital zircons in the Mesozoic strata within the Kubai Basin, however, were mainly derived from the Paleozoic forearc accretionary belt of the Dongalai-Haerkeshan, situated north of the Kuokeshaleling marginal basin belt. This pronounced shift in zircon provenance indicates that rapid uplift of the South Tianshan during the Cenozoic led to the exhumation and erosion of the Late Paleozoic Kuokeshaleling marginal basin belt, which subsequently became the principal sediment source for the Kubai Basin. The Early Permian alkaline plutons within this provenance region constituted the primary source of ore-forming material for the Yuhai zircon placer deposit, whereas the Mesozoic strata did not contribute recycled detritus to the mineralization process.

Keywords: Fluvial zircon placer deposit; Zircon geochronology; Source analysis; Kubai Basin; Southwestern Tianshan Mountain

0 引言

锆(Zr)作为一种重要的战略性关键稀有金属,因其独特的物理化学性质(高熔点、耐腐蚀、低热中子吸收截面),在核工业、航空航天、军工科技、特种陶瓷和耐火材料等高精尖领域具有不可替代的作用。长期以来,中国的锆资源对外依存度较高,寻找和发现大型-超大型锆矿床对保障国家资源安全和高技术产业发展具有至关重要的战略意义。最近,新疆维吾尔自治区地质局在塔里木盆地北缘的库拜盆地发现了具有超大型规模前景的宇海锆石砂矿床,首次在中国乃至世界范围内证实了陆相沉积盆地内同样可以形成世界级的锆石砂矿床(刘兵等, 2025),打破了锆石砂矿主要赋存于滨海风成或海浪分选环境的固有认知,为在全球范围内寻找同类型锆石矿床开辟了全新的思路 and 方向。

锆石(ZrSiO_4)作为一种副矿物,广泛存在于各类岩石中,尤其富集于中酸性岩浆岩和部分变质岩中。锆石的物理化学性质极为稳定,硬度高、抗风化和化学腐蚀能力强,使其在经历长距离搬运和多期次沉积循环后,仍能完好地保存其形成时的 U-Pb 同位素体系和地球化学信息(吴元保和郑永飞, 2004; 林旭等, 2020)。因此,沉积岩中碎屑锆石的 U-Pb 年龄谱,是记录源区地质历史的“指纹库”,可以有效地反演沉积物的源区及其构造-岩浆演化史(杨利荣等, 2017)。库拜盆地的锆石矿主要赋存于新生代(古近系-新近系)的松散-半固结含砾中-粗砂岩中,属于典型的外生碎屑型矿床。要深刻理解这一世界级矿床的形成机制,必须明确构成该矿床主体的海量锆石的年龄谱系特征,从而了解研究区新生代以来构造演化过程和沉积物质来源。

本研究团队对库拜盆地北缘古近系-新近系的各地层进行了详细的野外调查,采集了代表性的样品进行系统的锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年和微量元素研究,结合研究区及邻区已有的成果,探索库拜盆地北缘陆相锆石砂矿床的成矿物质来源,为研究该类型矿床的成因及后续的找矿工作提供理论指导。

1 区域地质背景

天山造山带位于中亚造山带南缘(图 1a),构造上以数条大断裂为界从北到南分为北天山造山带、伊犁-中天山地块和南天山造山带(图 1b)。库拜盆地包

括南天山中段山前的库车-拜城一带，是一个典型的中-新生代再生前陆盆地，其形成演化与特提斯构造域，特别是印度-欧亚板块碰撞的远程效应息息相关。在古生代，南天山经历了复杂的洋-陆转换过程，其洋盆的开启、闭合以及最终的碰撞造山，奠定了该地区主要的构造格架（李生喜等, 2023）。进入中-新生代，尤其是约 50 Ma 以来，印度-欧亚板块的持续碰撞所产生的远程应力效应，导致南天山造山带发生强烈再活化，表现为剧烈的山脉隆升、剥蚀以及向南的逆冲推覆，直接控制了其山前库拜盆地的形成与演化（Wang et al., 2018）。在新生代喜马拉雅运动期间，强烈的南北向挤压应力导致天山山脉发生剧烈的再生造山运动，大幅度隆升并向南逆冲推覆于塔里木盆地之上（阎福礼等, 2003）。

南天山晚古生代岩浆活动十分发育，其中沿塔里木盆地北缘发育一条近东西向展布的碱性岩带，该岩带西起阿图什地区，向东延伸至尉犁一带，广泛分布于南天山北缘及塔里木盆地北缘地区（Xie et al., 2022）。该碱性岩带主要形成于早二叠世，岩性以碱性花岗岩、正长岩及相关过碱性岩石为主，是南天山后碰撞伸展背景下深部岩浆作用的重要产物。由于该类岩石通常富集 Zr、Nb、Ta、Hf 等高场强元素，并含有大量锆石等富锆副矿物，因此被认为是区域重要的潜在锆石物源。其中，研究区北部拜城县波孜果尔地区发育典型的早二叠世碱性花岗岩体，是塔里木盆地北缘碱性岩带的重要组成部分，为研究库拜盆地碎屑锆石物源演化提供了关键参考（刘春花等, 2014）。

东阿赖-哈尔克山古生代弧前增生带和阔克沙勒岭晚古生代陆缘盆地带近东西向展布于库拜盆地北缘（冯京等, 2022；图 1c）。库拜盆地接收了北部构造带隆升剥蚀下来的巨量碎屑沉积物，发育了从古近系到新近系乃至第四系的陆相沉积序列，自下而上包括古-始新统库姆格列木群（E₁₋₂km）、渐新统阿瓦特组（E_{3a}）、中新统吉迪克组（N_{1j}）、康村组（N_{1k}）和上新统库车组（N_{2k}），岩性主要为砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩的互层。这种快速隆升的物源区与持续沉降的沉积区并存的“山-盆”耦合系统，为形成大型碎屑型矿床提供了得天独厚的构造和沉积条件。天山造山带的隆升，如同一个巨大的“物料工厂”，不断地剥蚀和“释放”其内部蕴含的包括锆石在内的各种矿物，而库拜盆地则像一个巨大的“储藏盆”，为这些重矿物的最终富集和保存提供了广阔的空间。

值得注意的是,宇海锆石砂矿床不同于传统滨海型锆石砂矿床,其形成于典型的陆相前陆盆地环境中。由于锆石主要来源于富锆岩浆岩的风化剥蚀,其大规模富集不仅需要稳定的物源供应,还需要适宜的沉积动力条件和长期保存空间。因此,厘清库拜盆地北缘南天山造山带的构造隆升过程、富锆岩浆岩分布特征以及新生代沉积演化,是认识该类新型陆相锆石砂矿床成因的关键。已有研究表明,南天山北缘广泛发育晚古生代岩浆岩,尤其是早二叠世碱性岩浆岩,其具有较高的锆含量,为区域锆石资源提供了潜在物质基础。然而,随着新生代印度-欧亚板块碰撞远程效应导致南天山快速隆升,不同构造时期物源区的转换过程及其对锆石富集的控制作用仍缺乏系统研究。因此,利用碎屑锆石 U-Pb 年代学和微量元素组成示踪宇海锆石砂矿床的物质来源,对于揭示陆相锆石砂矿床形成机制及预测区域找矿潜力具有重要意义。

2 矿区地质特征与样品采集

库拜盆地位于塔里木盆地北缘、南天山造山带西南缘(图 2a),自北而南可分为多个构造单元(图 2b),如:北部单斜带、克拉苏构造带、拜城凹陷、秋里塔格构造带和南部斜坡带等(高志勇等,2008;赵佳琦等,2026)。野外地质调查发现,盆地内同一个组的沉积环境和物源条件在不同构造位置都存在差异,导致沉积相类型和陆源碎屑组分各不相同。宇海锆石砂矿床位于克拉苏构造带北部,靠近南天山造山带,该区构造活动强烈,地形坡度较大,以冲积扇和扇三角洲为主要沉积相类型,沉积物粒度粗,分选差,反映近源快速堆积的特征(朱如凯等,2007)。自古新统至上新统,研究区构造活动经历了由强变弱再增强的过程,沉积相表现为冲积扇—扇三角洲平原—扇三角洲前缘—扇三角洲平原—冲积扇的演化过程,中新统康村组中段构造活动最弱,沉积碎屑粒度最细(图 2c)。

宇海锆石砂矿床锆石达到可利用含量的沉积地层主要有古-始新统库姆格列木群(E_{1-2km})、渐新统阿瓦特组(E_{3a})、中新统吉迪克组(N_{1j})和康村组(N_{1k})。样品采自上述四个层位中的砂岩夹层,每层均含有一定量的砾石,为避免砾石、残坡积和冲洪积层的干扰,所有样品均采自地表以下 30 cm 左右的新鲜层位,野外破碎后用 40 目分选筛分选。采集的每层对应的样品分别为 25BCPM03-9-1 红色中砂岩(E_{1-2km} ; $42^{\circ}04'43''N$ & $81^{\circ}46'54''E$)、25BCPM03-18-1 黄色中砂岩

(E_{3a}; 42°04'27"N & 81°46'57"E)、25BCPM03-23-1 红色粗砂岩 (N_{1j}; 42°04'17"N & 81°46'58"E) 和 25BCPM03-27-1 红色中砂岩 (N_{1k}; 42°04'11"N & 81°46'56"E)，均为去除砾石后的基质的岩性。

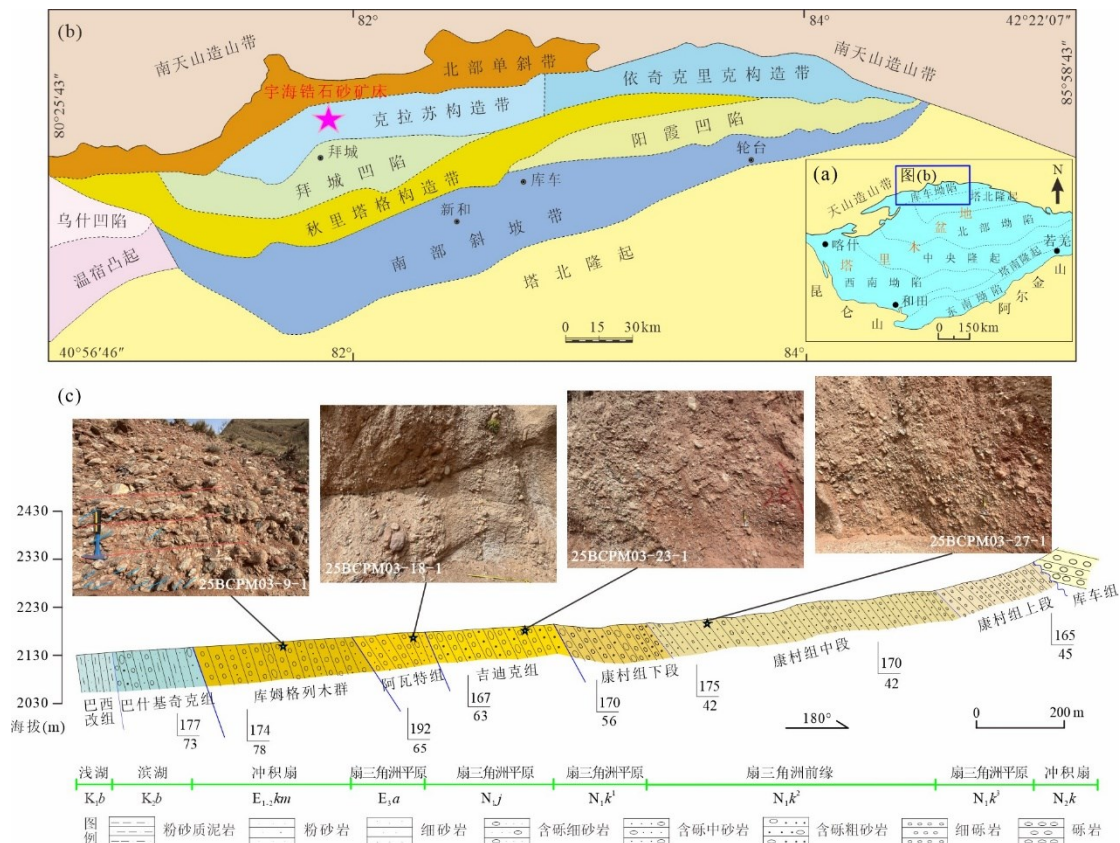


图2 库拜盆地的构造位置 (a) 与构造分区 (b) 及宇海锆石砂矿床中-新生代地层剖面图 (c)。

Fig.2 Tectonic position (a) and subdivisions (b) of the Kubai Basin and stratigraphic section diagram of Mesozoic-Cenozoic strata in the Yuhai zircon placer deposit in the basin (c).

3 分析方法及结果

3.1 锆石形貌与内部结构特征

样品在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司进行锆石分选及制靶,在中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室(GPMR)场发射扫描电镜(SEM)实验室进行锆石阴极发光(CL)显微拍摄。四个样品具有相似的锆石形貌学特征,锆石颗粒无色透明,大部分晶体呈半自形-自形棱柱状,边界较平直,棱角清晰,少量为它形不规则碎屑状,发育裂隙及局部破碎结构,表明碎屑锆石多为近距离搬运(图3)。锆石粒径大小在 50-250 μm 之间,长宽比变化较大,

主要集中于 1.5:1~4:1 之间。值得注意的是，库姆格列木群中的锆石多以细小颗粒为主。

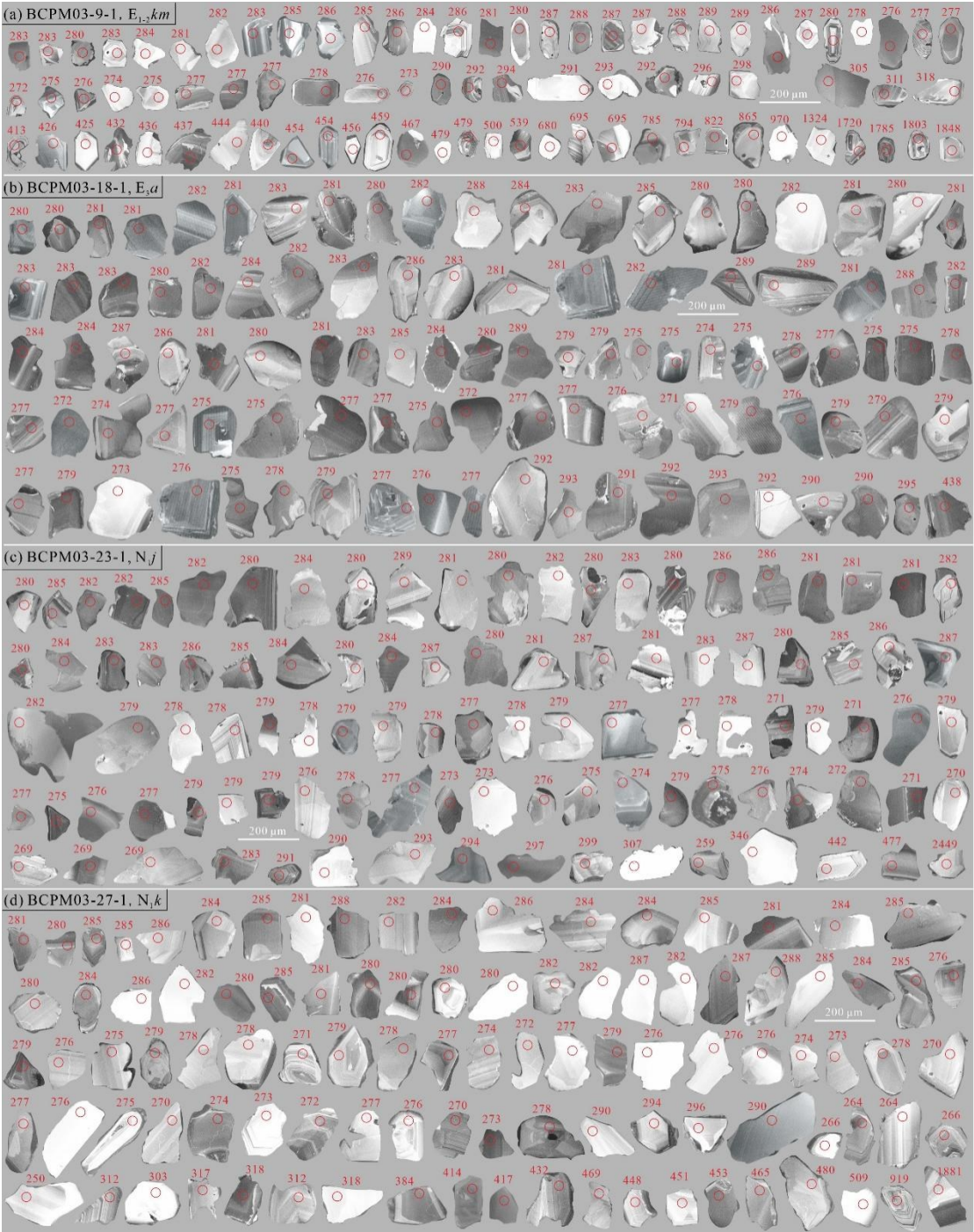


图 3 库拜盆地宇海锆石砂矿床新生代地层锆石阴极发光图像和测点位置与年龄值 (Ma) .
Fig.3 Zircon CL images, analysis points and U-Pb ages (Ma) of the Cenozoic strata in the Yuhai zircon placer deposit in Kubai Basin.

四个样品中多数锆石发育明暗相间的振荡环带，环带多平行晶面生长，显示岩浆锆石的特征（Hoskin and Schaltegger, 2003）。部分颗粒无明显振荡环带，呈

灰白色或浅灰色均质发光特征，局部可见较弱的环带残余，可能经历后期热事件改造或重结晶作用（吴元保和郑永飞, 2004）。少数锆石存在增生边或具有不规则港湾状边界，环带被截切，与核部存在明显差异的发光强度，指示锆石曾遭受熔体或流体作用，引起熔蚀及后期再生长。

3.2 锆石 U-Pb 年龄特征

锆石 U-Pb 定年与微量元素分析在中国地质大学（武汉）地球与行星科学学院同位素地球化学分析实验室 LA-Q-ICP-MS 系统（RESOLUTION LR 193nm ArF 准分子激光剥蚀系统和安捷伦 7900 四极杆电感耦合等离子体质谱仪）测试完成。在分析之前先校准激光剥蚀系统参数，并用多元素溶液对四极杆质谱仪完成调谐优化。激光剥蚀过程中束斑直径为 29 μm ，剥蚀频率为 6 Hz，能量密度为 4.2 J/cm²。四极杆质谱的 ²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb 和 ²⁰⁸Pb 驻留时间设置为 15 ms，²³²Th 和 ²³⁸U 的驻留时间为 10 ms，其它元素同位素的驻留时间为 8 ms。每个分析点包含 20 秒的背景时间和 50 秒的剥蚀时间，共测量约 140 组待测同位素数据。所有样品的微量元素含量由 NIST SRM 610 玻璃校准，以 ²⁹Si 作为内标。91500 锆石（共分析 72 个；TIMS ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄 1065.4 $\pm$ 0.3 Ma；Wiedenbeck et al., 1995）用于校准质量歧视和仪器漂移的外标，每十次分析测试两次。实验中还插入了锆石标样 GJ-1（共分析 43 次；TIMS ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 599.8 $\pm$ 4.5 Ma；Jackson et al., 2004）和 Plešovice（共分析 43 次；ID-TIMS ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 337.1 $\pm$ 0.4 Ma；Sláma et al., 2008）作为未知样品，以监测年龄数据的质量。测试结果用 Iolite V4.0 软件处理，计算 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb、²⁰⁶Pb/²³⁸U、²⁰⁷Pb/²³⁵U、²⁰⁸Pb/²³²Th 比值和对应的年龄结果以及绘制谐和图（Paton et al., 2011; Petrus and Kamber, 2012）。锆石 U-Pb 定年结果和微量元素组成见附表 1 和 2。

对 4 个砂岩样品中的 398 颗碎屑锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 年代学分析，去除谐和度低于 90% 的颗粒，剩余的 356 颗锆石结果显示库拜盆地新生代地层均存在一个非常强烈的几乎一致的早二叠世年龄峰，该峰值在各个组中构成了压倒性的单峰或近单峰分布模式，其占比分别为 60%（E_{1-2km}；图 4a）、100%（E_{3a}；图 4c）、97%（N_{1j}；图 4e）、80%（N_{1k}；图 4g），峰值年龄分别为 284 Ma（E_{1-2km}；图 4b）、281 Ma（E_{3a}；图 4d）、280 Ma（N_{1j}；图 4f）和 281 Ma（N_{1k}；图 4h）。另有较弱的早古生代年龄峰在库姆格列木群和康村组出现，分别为 456

Ma 和 448 Ma, 在阿瓦特组不出现, 吉迪克组中仅有一颗 477 Ma。除了上述年龄峰外, 库姆格列木群中还存在零星分布的前寒武纪锆石, 年龄值在新元古代 (694-970 Ma)、中元古代 (1324 Ma) 和古元古代 (1874-2449 Ma), 在其它组中几乎可以忽略。这些古老的锆石颗粒可能代表了物源区中存在的少量古老基底岩石或再循环的沉积岩的贡献。四个新生代地层的样品中均没有中生代和新生代的锆石年龄记录, 表明物源区并未发育中生代或新生代的岩浆活动, 或者这些岩石尚未被抬升至地表。

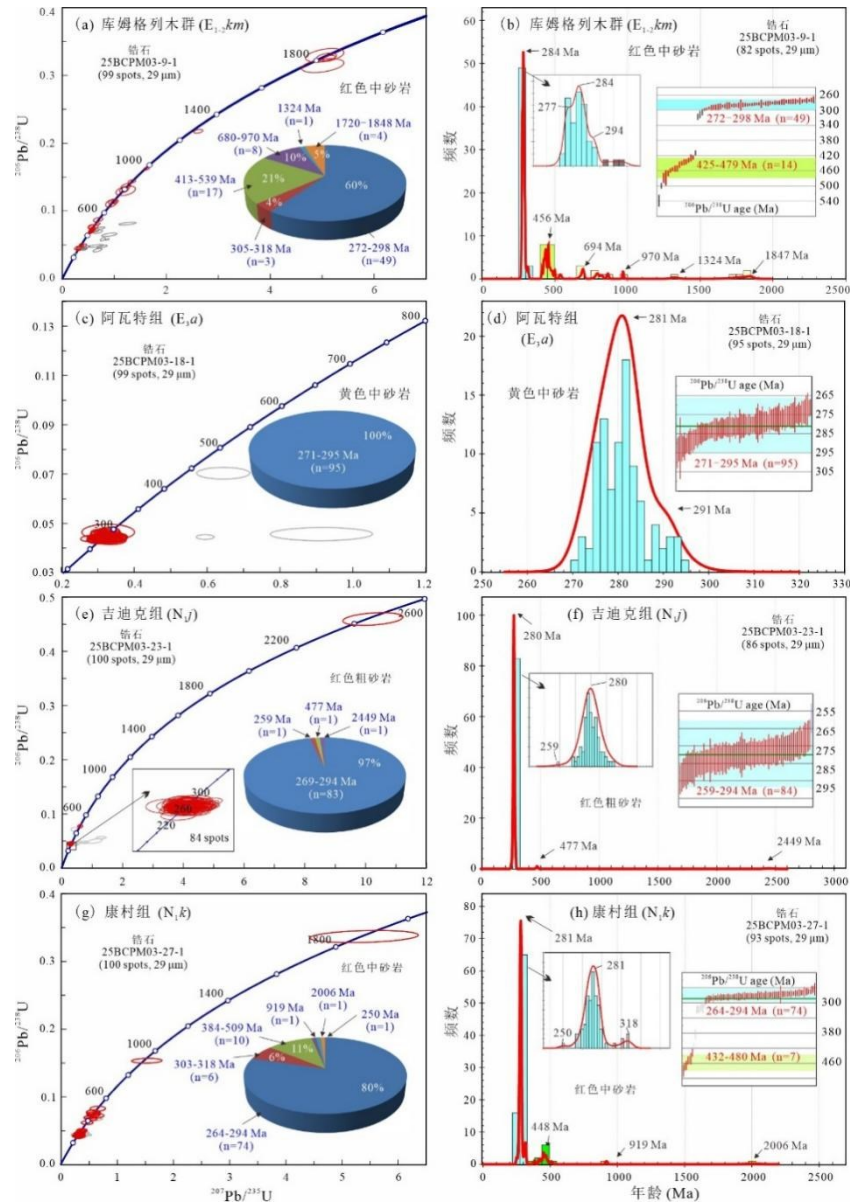


图 4 库拜盆地宇海锆石砂矿床新生代地层碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图 (a, c, e, g) 和年龄频谱图 (b, d, f, h)。

Fig.4 Zircon U-Pb concordia ages (a, c, e, g) and frequency distribution histograms (b, d, f, h) of the Cenozoic strata in the Yuhai zircon placer deposit in Kubai Basin.

3.3 锆石微量元素特征

给出谐和年龄的锆石颗粒 Th/U 比值均大于 0.1，绝大部分测试点具有一致的稀土元素含量，在球粒陨石标准化图解中总体表现为左倾型（图 5a, d, g, j），具有明显的轻稀土元素亏损和重稀土元素富集，普遍具有显著的正 Ce 异常和明显的负 Eu 异常，符合岩浆锆石的典型地球化学特征（Rubatto and Gebauer, 2000）。明显的负 Eu 异常反映了岩浆演化过程中斜长石的分离结晶，而较强的正 Ce 异常则指示岩浆体系具有较高的氧逸度。部分颗粒具有海鸥状稀土配分模式特征，可能与晚期变质作用改造或石榴子石效应有关。在 $\text{Y (ppm) vs. U (ppm)}$ 判别图中（Belousova et al., 2002），绝大多数测试点都落在花岗岩区，极少量散布在花岗闪长岩、闪长岩、钾镁煌斑岩等区域（图 5b, e, h, k），指示源岩主要为花岗岩类。在 $(\text{Nb/Pb})_{\text{N}} \text{ vs. Eu/Eu}^*$ 判别图中（Wang et al., 2012），库姆格列木群中的二叠纪碎屑锆石主要落在 A 型花岗岩和 S 型花岗岩区域，两者含量近相等，个别颗粒落在 I 型花岗岩区，其余更古老的锆石颗粒在 A 型和 S 型花岗岩区均有出现（图 5c）；阿瓦特组中均为二叠纪锆石，多数落在 A 型花岗岩区，少部分落在 S 型花岗岩区（图 5f）；吉迪克组中的二叠纪锆石则绝大部分均落在 A 型花岗岩区（图 5i）；康村组中的二叠纪锆石也几乎都落在 A 型花岗岩区，其余颗粒则落在 S 型和 I 型花岗岩区（图 5l）。

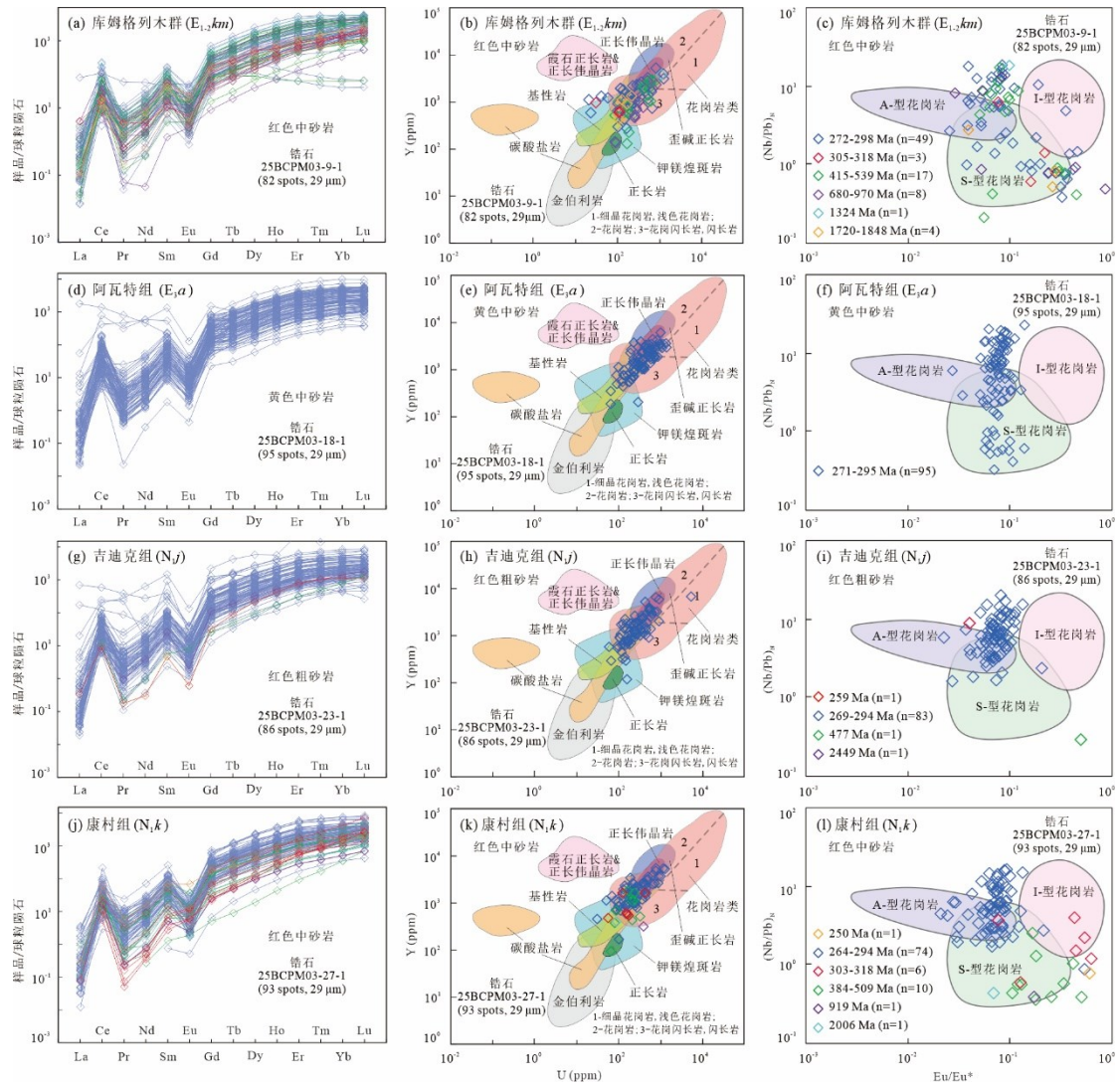


图 5 库拜盆地宇海锆石砂矿床新生代地层锆石稀土元素配分模式图 (a, d, g, j)、Y (ppm) vs. U (ppm) 判别图 (b, e, h, k; 底图据 Belousova et al., 2002) 和 (Nb/Pb)_N vs. Eu/Eu* 判别图 (c, f, i, l; 底图据 Wang et al., 2012)。

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns (a, d, g, j), Y (ppm) vs. U (ppm) discrimination diagram (b, e, h, k; after Belousova et al., 2002) and (Nb/Pb)_N vs. Eu/Eu* discrimination diagram (c, f, i, l; after Wang et al., 2012) for detrital zircons from the Cenozoic strata in the Yuhai zircon placer deposit in Kubai Basin.

单一的元素比值在对锆石类型的区分上存在较大的误差, 前人通过对全球积累的锆石微量大数据进行了机器学习测试, 其中包括支持向量机 (SVM, Support Vector Machine)、随机森林 (RF, Random Forest) 两种机器学习方法和多层感知器 (MLP, Multilayer Perceptron) 深度学习模型, 对传统方法中重叠或无法区分的部分可以进行更精细的划分 (Zhong et al., 2023), 本文使用这三种不同的方法对锆石的微量元素进行机器学习的寄主岩岩浆类型判别, 结果显示四个样品二

叠纪的碎屑锆石主要来源于 A 型花岗岩。其中，库姆格列木群 SVM 占 71%, RF 占 69%, MLP 占 63% (图 6a)；阿瓦特组 SVM 占 86%, RF 占 92%, MLP 占 94% (图 6b)；吉迪克组 SVM 占 81%, RF 占 92%, MLP 占 83% (图 6c)；康村组 SVM 占 100%, RF 占 85%, MLP 占 92% (图 6d)，更为古老的锆石则各种类型均有产出。

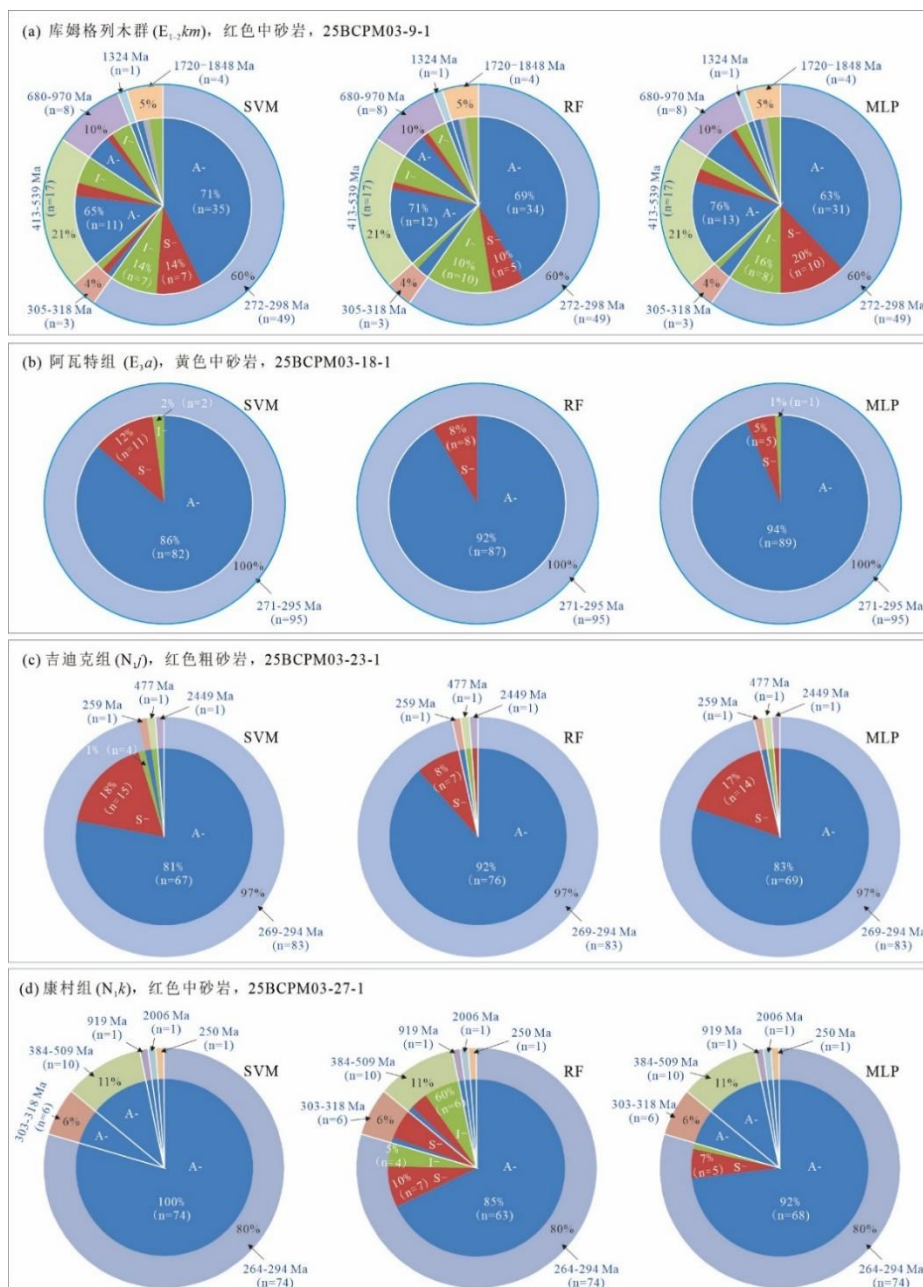


图 6 库拜盆地宇海锆石砂矿床新生代地层碎屑锆石微量元素机器学习的寄主岩岩浆类型判别图。

Fig.6 Host-rock magmatic type discrimination diagrams by zircon trace element machine learning for detrital zircons from the Cenozoic strata in the Yuhai zircon placer deposit in Kubai Basin.

4 讨论

4.1 宇海锆石砂矿床碎屑锆石物源分析

碎屑锆石不仅可以限定岩石形成时代,还记录了源岩的年代信息,已成为追踪沉积物物源的重要工具(Fedo et al., 2003; Howard et al., 2009; Tucker et al., 2013; 罗彦军等, 2025)。库拜盆地陆相锆石砂矿床的碎屑锆石形态特征指示为近源沉积, 锆石年龄频谱图显示 281 Ma 的主峰和微弱的 462 Ma 的次峰(图 7a)。前人对库拜盆地内的中生代沉积地层、北缘的阔克沙勒岭晚古生代陆缘盆地带出露的岩浆岩、以及更北部的东阿赖-哈尔克山古生代弧前增生带均做了大量的年代学研究(图 1c; 附表 3), 系统的锆石 U-Pb 定年结果表明: 1) 库车坳陷内的中生代砂岩地层(如库车河剖面、黑英山剖面)存在 417 Ma 和 294 Ma 两个主要的年龄峰(图 7b; Liu et al., 2013; Han et al., 2016); 2) 阔克沙勒岭晚古生代陆缘盆地带主要以玄武岩、火山角砾岩与粉砂岩、砂岩和砂质砾岩互层产出为特征, 并发育大量的石炭纪-二叠纪侵入体(Huang et al., 2015), 岩体中锆石年龄指示一个 284 Ma 的主峰和~353 Ma、~390 Ma、~434 Ma 的次级年龄峰(图 7c); 3) 东阿赖-哈尔克山古生代弧前增生带出露有大量的弧岩浆岩, 岩性主要以花岗岩(Gao et al., 2009; Long et al., 2011; Gou et al., 2015; Huang et al., 2015; Xia et al., 2016)、闪长岩(Long et al., 2011)、正长岩(Gao et al., 2009)、石英二长岩(Gou and Zhang, 2016)为主, 局部存在少量玄武岩(Qian et al., 2009; Ma et al., 2025), 锆石年龄显示 294 Ma 和 438 Ma 两个主峰, 另有 266 Ma 的次峰和少量前寒武纪继承锆石(图 7d)。通过锆石年龄频谱图对比可知, 库拜盆地锆石砂矿床的主要物源应来自阔克沙勒岭晚古生代陆缘盆地带。

库拜盆地内自西向东的拜城、黑英山和库车河三个地区的中生代地层中的碎屑锆石年龄峰相似, 包括: 475-370 Ma (奥陶纪-泥盆纪)、340-270 Ma (石炭纪-二叠纪)、250-230 Ma (三叠纪)、165-145 Ma (晚侏罗世) 4 组, 年龄谱呈现多峰形态, 也有比例不高的前寒武纪年龄锆石(黄少英等, 2025), 说明中生代物源相对复杂, 可能存在多个源区的贡献, 与东阿赖-哈尔克山古生代弧前增生带锆石年龄特征相似。进入新生代, 特别是渐新世-中新世以来, 年龄谱迅速转变为以晚古生代年龄为主的单峰模式。这一转变过程记录了物源区的重大构造变革, 即阔克沙勒岭晚古生代陆缘盆地带在新生代开始占据绝对主导地位。

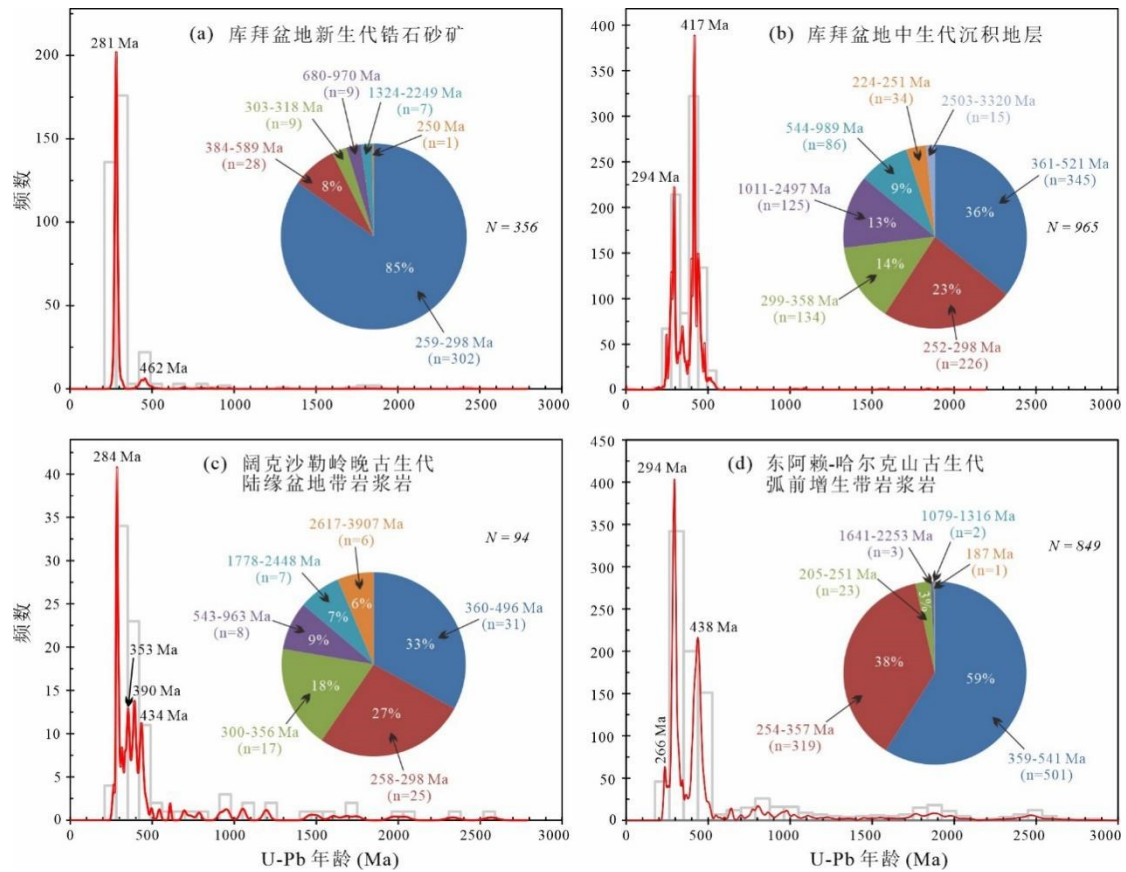


图 7 库拜盆地锆石砂矿床碎屑锆石 (a) 与周缘中生代地层 (b) 和岩浆岩带 (c, d) 锆石年龄频谱对比图。

Fig.7 Zircon age spectrum comparison diagrams among the detrital zircons from the zircon placer deposit in Kubai Basin (a), the adjacent Mesozoic strata (b) and magmatic rock belts (c, d).

图 (b) 数据来源于 Liu et al. (2013), Han et al. (2016); 图 (c) 数据来源于 Huang et al. (2015); 图 (d) 数据来源于 Gao et al. (2009), Qian et al. (2009), Long et al. (2011), Gou et al. (2015), Gou and Zhang (2016), Xia et al. (2016).

库拜盆地古-始新统库姆格列木群 (E_{1-2km})、渐新统阿瓦特组 (E_{3a}) 和中新统吉迪克组 (N_{1j})、康村组 (N_{1k}) 碎屑锆石年龄的主峰值均为 284-280 Ma, 锆石微量元素特征指示 A 型花岗岩的物质源区。该年龄峰值与塔里木大火成岩省岩浆活跃期 (290-270 Ma, 峰期~280 Ma) 的时限一致, 该阶段不仅形成了巨量玄武岩和伴生的长英质火山岩, 还在塔里木北缘形成了长度大于 1000 千米的碱性岩带, 岩性以碱性花岗岩、石英正长岩、正长岩、霓辉石正长岩、霓霞正长岩为主, 还有碱性辉长岩、霓辉石闪长岩、钠铁闪石正长岩、霓辉石花岗岩等岩石类型 (Xie et al., 2022)。在库拜盆地北缘阔克沙勒岭晚古生代陆缘盆地带以波孜果尔碱性岩体为代表, 其锆石 U-Pb 年龄为 288-292 Ma (平均为 290 Ma) (刘春

花等, 2014)。这些碱性岩浆具有富集高场强元素的地球化学特征, 且花岗质的碱性岩普遍为 A 型花岗岩。由于显著高的 Zr 含量, 碱性岩中锆石的丰度明显高于其它成分的岩浆岩, 其风化剥蚀产物可提供大量的碎屑锆石颗粒。因此, 库拜盆地北缘阔克沙勒岭晚古生代陆缘盆地发育的大量早二叠世碱性岩体为该锆石砂矿床的主要物源。样品中的次峰值年龄 452-477 Ma 与南天山造山带广泛发育的早古生代弧岩浆岩的形成时代高度一致, 来源于早古生代洋盆俯冲增生过程中形成的大量的花岗岩、花岗闪长岩、火山岩等 (Long et al., 2011)。

4.2 南天山新生代构造隆升与锆石富集过程

从中生代的复杂物源到新生代的单一主导物源的转变, 记录了天山造山带在新生代的构造复活和加速隆升。特别是中新世 (约 20 Ma) 以来, 南天山的隆升速率显著增加 (张玲等, 2018), 形成了一道巨大的地形屏障, 彻底阻断了来自其北侧 (如伊犁-中天山地块) 的物源供给。同时, 快速的隆升导致山体遭受强烈的物理和化学剥蚀, 深部的晚古生代岩体 (即“锆石矿的母岩”) 被大规模地风化破碎, 释放出巨量的含锆石碎屑, 汇入到南侧的库拜前陆盆地中并在适合的砂体中富集。因此, 碎屑锆石年龄谱的“纯化”过程, 实际上是南天山隆升并成为主导物源区的直接沉积响应。少量元古宙锆石的存在, 可能暗示南天山造山带内部包含了被卷入到古生代造山过程中的古老微陆块或基底残片, 或者这些古老锆石来源于对古生代沉积岩的再循环剥蚀。而中、新生代锆石的稀缺, 则说明了南天山在新生代隆升过程中, 主要是以构造变形和物理剥蚀为主, 近地表区域并未发生大规模的同期岩浆活动。

综上所述, 南天山构造带经历了多期次的俯冲、碰撞及后期构造改造, 地质背景极度复杂。虽然 U-Pb 年龄和微量元素分析会面临一定的解译多解性, 但通过综合对比, 依然能够清晰地勾勒出库拜盆地陆相锆石砂矿成矿物质来源的宏观图景: 一个以早二叠世碱性岩体为主的南天山造山带南缘, 在新生代构造运动的驱动下抬升剥蚀, 成为了持续供应碎屑锆石的“物源库”。

5 结论

(1) 新疆库拜盆地陆相宇海锆石砂矿床的赋矿地层有古-始新统库姆格列木群、渐新统阿瓦特组、中新统吉迪克组和康村组, 碎屑锆石均为近源沉积, 各个

组均存在一个占统治地位的早二叠世年龄峰,峰值年龄分别为 284 Ma、281 Ma、280 Ma 和 281 Ma。另有较弱的早古生代年龄峰在库姆格列木群和康村组出现,分别为 456 Ma 和 448 Ma,在阿瓦特组和吉迪克组中几乎不出现。库姆格列木群中还存在零星分布的元古宙锆石,在其它组中几乎可以忽略。

(2) 宇海锆石砂矿床新生代赋矿地层中占主导的二叠纪碎屑锆石源区以 A 型花岗质岩石为主,来源于库拜盆地北缘的阔克沙勒岭晚古生代陆缘盆地发育的二叠纪碱性岩带,古生代、元古宙碎屑锆石指示了极少量更北侧的石炭纪-古元古代地质体的供给。中生代地层的碎屑锆石则来源于阔克沙勒岭晚古生代陆缘盆地更北侧的东阿赖-哈尔克山古生代弧前增生带。

(3) 新生代以来南天山快速隆升,造山带南缘阔克沙勒岭晚古生代陆缘盆地抬升剥蚀,成为库拜盆地的主要物源供给区。其中的早二叠世碱性岩体是宇海锆石砂矿的主要成矿物质来源,而中生代地层则没有作为再循环物质参与成矿。

参考文献

- Belousova, E., Griffin, W., O'Reilly, S.Y., Fisher, N., 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602-622.
- Fedo, C.M., Sircombe, K.N., Rainbird R.H., 2003. Detrital zircon analysis of the sedimentary record. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 277-303.
- Gao, J., Long, L.L., Klemd, R., Qian, Q., Liu, D.Y., Xiong, X.M., Su, W., Liu, W., Wang, Y.T., Yang, F.Q., 2009. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: geochemical and age constraints of granitoid rocks. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 1221-1238.
- Gou, L.L., Zhang, L.F., Lü, Z., Shen, T.T., 2015. Geochemistry and geochronology of S-type granites and their coeval MP/HT meta-sedimentary rocks in Chinese Southwest Tianshan and their tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 107: 151-171.
- Gou, L.L., Zhang, L.F., 2016. Geochronology and petrogenesis of granitoids and associated mafic enclaves from Xiata in Chinese Southwest Tianshan: Implications for early Paleozoic tectonic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115: 40-61.
- Han, Y.G., Zhao, G.C., Sun, M., Eizenhöfer, P.R., Hou, W.Z., Zhang, X.R., Liu, D.X., Wang, B., 2016. Detrital zircon provenance constraints on the initial uplift and denudation of the Chinese western Tianshan after the assembly of the southwestern Central Asian Orogenic Belt. *Sedimentary Geology*, 339: 1-12.
- Huang, H., Zhang, Z.C., Santosh, M., Zhang, D.Y., Wang, T., 2015. Petrogenesis of the Early Permian volcanic rocks in the Chinese South Tianshan: Implications for crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 228-229: 23-42.
- Hoskin, P.W.O., Schaltegger, U., 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 27-62.
- Howard, K.E., Hand, M., Barovich, K.M., Reid, A., Wade, B.P., Belousova, E.A., 2009. Detrital zircon ages: Improving interpretation via Nd and Hf isotopic data. *Chemical Geology*, 262(3-4): 277-292.
- Jackson, S.E., Pearson, N.J., Griffin, W.L., Belousova, E.A., 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211: 47-69.
- Liu, D.D., Jolivet, M., Yang, W., Zhang, Z.Y., Cheng, F., Zhu, B., Guo, Z.J., 2013. Latest Paleozoic–Early Mesozoic basin-range interactions in South Tian Shan (northwest China) and their tectonic significance: Constraints from detrital zircon U-Pb ages. *Tectonophysics*, 599: 197-213.
- Long, L.L., Gao, J., Klemd, R., Beier, C., Qian, Q., Zhang, X., Wang, J.B., Jiang, T., 2011. Geochemical and geochronological studies of granitoid rocks from the Western Tianshan Orogen: Implications for continental growth in the southwestern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 126(3-4): 321-340.
- Ma, L.T., Dai, L.Q., Hu, Y.D., Zhao, Z.F., 2025. Origin of the coeval Nb-enriched and arc mafic igneous rocks: Implications for Paleozoic tectonic evolution of the Southwestern Tianshan. *Chemical Geology*, 674: 122582.
- Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J., Hergt, J., 2011. Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26: 2508-2518.
- Petrus, J.A., Kamber, B.S., 2012. VizualAge: A novel approach to laser ablation ICP-MS U-Pb geochronology data reduction. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 36: 247-270.
- Qian, Q., Gao, J., Klemd, R., He, G.Q., Song, B., Liu, D.Y., Xu, R.H., 2009. Early Paleozoic tectonic evolution of the Chinese South Tianshan Orogen: constraints from SHRIMP zircon U-Pb geochronology and geochemistry of basaltic and dioritic rocks from Xiata, NW China. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 551-569.

- Rubatto, D., Gebauer, D., 2000. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by ion microprobe: some examples from the Western Alps. In: Pagel, M., Barbin, V., Blanc, P., Ohnenstetter, D. (Eds.), *Cathodoluminescence in Geosciences*. Springer, Berlin, pp. 373–400.
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D.J., Crowley, J.L., Gerdes, A., Hanchar, J.M., Horstwood, M.S.A., Morris, G.A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M.N., Whitehouse, M.J., 2008. Plešovice zircon — A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249: 1–35.
- Tucker, R.T., Roberts, E.M., Hu, Y., Kemp, A.I.S., Salisbury, S.W., 2013. Detrital zircon age constraints for the Winton Formation, Queensland: Contextualizing Australia Late Cretaceous dinosaur faunas. *Gondwana Research*, 24(2): 767–779.
- Wang, Q., Zhu, D.C., Zhao, Z.D., Guan, Q., Zhang, X.Q., Sui, Q.L., Hu, Z.C., Mo, X.X., 2012. Magmatic zircons from I-, S- and A-type granitoids in Tibet: Trace element characteristics and their application to detrital zircon provenance study. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 59–66.
- Wang, X.S., Klemm, R., Gao, J., Jiang, T., Li, J.L., Xue, S.C., 2018. Final assembly of the southwestern Central Asian Orogenic Belt as constrained by the evolution of the South Tianshan Orogen: Links with Gondwana and Pangea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(9): 7361–7388.
- Wiedenbeck, M., Alle, P., Corfu, F., Griffin, W.L., Meier, M., Oberli, F., Vonquadt, A., Roddick, J.C., Spiegel, W., 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter* 19, 1–23.
- Xia, B., Zhang, L.F., Zhang, L., 2016. Petrogenesis and tectonic implications of Permian post-collisional granitoids in the Chinese southwestern Tianshan, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 130: 60–74.
- Xiao, W.J., Windley, B.F., Hao, J., Zhai, M.G., 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22: 1069. doi:10.1029/2002TC001484.
- Xie, M.C., Xiao, W.J., Su, B.X., Sakyi, P.A., Ao, S.J., Zhang, J.E., Song, D.F., Zhang, Z.Y., Li, Z.Y., Han, C.M., 2022. REE mineralization related to carbonatites and alkaline magmatism in the northern Tarim basin, NW China: implications for a possible Permian large igneous province. *International Journal of Earth Sciences*, 111: 2759–2776.
- Zhong, S.H., Liu, Y., Li, S.Z., Bindeman, I.N., Cawood, P.A., Seltmann, R., Niu, J.H., Guo, G.H., Liu, J.Q., 2023. A machine learning method for distinguishing detrital zircon provenance. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 178: 35.

中文参考文献

- 冯京, 朱志新, 赵同阳, 陈正乐, 顾雪祥, 孟贵祥, 徐仕琪, 田江涛, 李平. 2022. 新疆大地构造单元划分及成矿作用. *中国地质*, 49(4): 1154–1178.
- Feng, J., Zhu, Z.X., Zhao, T.Y., Chen, Z.L., Gu, X.X., Meng, G.X., Xu, S.Q., Tian, J.T., Li, P., 2022. Subdivision of tectonic units and its metallogenesis in Xinjiang. *Geology in China*, 49(4): 1154–1178 (in Chinese with English abstract).
- 高志勇, 郭宏莉, 安海亭, 朱如凯, 张丽娟, 孙玉善. 2008. 库车坳陷东部山前带古近系不同体系域内扇三角洲沉积砂体的对比研究. *地质科学*, 43(4): 758–776.
- Gao, Z.Y., Guo, H.L., An, H.T., Zhu, R.K., Zhang, L.J., Sun, Y.S., 2008. Paleogene fan-delta sandbodies of different system tracts in foreland of the eastern Kuqa Depression: A comparative study. *Chinese Journal of Geology*, 43(4): 758–776 (In Chinese with English Abstract).
- 黄少英, 雷钰薇, 罗彩明, 段云江, 亢茜, 吴鸿翔, 王子一, 章凤奇, 程晓敢. 2025. 库车坳陷中生代成盆构造背景与天山造山带古地貌演变—多剖面碎屑锆石 U-Pb 年龄限定. *地质评论*, 71(2): 655–669.

- Huang, S.Y., Lei, Y.W., Luo, C.M., Duan, Y.J., Kang, Q., Wu, H.X., Wang, Z.Y., Zhang, F.Q., Cheng, X.G., 2025. Mesozoic Basin-forming tectonic setting in the Kuqa Depression and paleomorphologic evolution of the Tianshan Orogenic Belt—Constraints from multi-profile detrital zircon U-Pb ages. *Geological Review*, 71(2): 655-669 (In Chinese with English Abstract).
- 阎福礼, 卢华复, 贾东, 于际民. 2003. 塔里木盆地库车坳陷中、新生代沉降特征探讨. *南京大学学报(自然科学版)*, 39(1): 31-39.
- Yan, F.L., Lu, H.F., Jia, D., Yu, J.M., 2003. The Meso-Cenozoic subsidence features of Kuqa depression, Tarim Basin. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 39(1): 31-39 (In Chinese with English Abstract).
- 李生喜, 何碧, 杨博, 魏志福, 陶刚, 甘保平, 赵飞, 孙平原, 赵振琯, 黄鹏飞. 2023. 南天山地块塔格拉克地区二长花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征: 对壳源岩浆成因和构造背景的限定. *中国地质*, 50(2): 622-639.
- Li, S.X., He, B., Yang, B., Wei, Z.F., Tao, G., Gan, B.P., Zhao, F., Sun, P.Y., Zhao, Z.G., Huang, P.F., 2023. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Tagelake monzogranites in South Tianshan block: Constraints on crustal magmatic origin and tectonic setting. *Geology in China*, 50(2): 622-639 (In Chinese with English Abstract).
- 林旭, 刘静, 吴中海, 王世梅, 赵希涛, 陈勇, 李兆宁, 刘海金. 2020. 中国北部陆架海碎屑锆石 U-Pb 年龄和钾长石主微量元素物源示踪研究. *地质学报*, 94(10): 3024-3035.
- Lin, X., Liu, J., Wu, Z.H., Wang, S.M., Zhao, X.T., Chen, Y., Li, Z.N., Liu, H.J., 2020. Detrital zircon U-Pb ages and K-feldspar main and trace elements provenance studying from fluvial to marine sediments in northern China. *Acta Geologica Sinica* 94(10): 3024-3035 (In Chinese with English Abstract).
- 刘兵, 李益龙, 彭宇, 刘崑国, 王国庆, 时显振, 韩建华, 王海涛, 林泽华, 殷豫江, 韩继全, 马思捷, 高奇, 喻福涛, 曾小波, 2025. 新疆库拜盆地北缘古河湖相锆石砂矿的发现实现我国锆矿找矿突破. *地球科学*, 50(6): 2452-2456.
- Liu, B., Li, Y.L., Peng, Y., Liu, W.G., Wang, G.Q., Shi, X.Z., Han, J.H., Wang, H.T., Lin, Z.H., Yin, Y.J., Han, J.Q., Ma, S.J., Gao, Q., Yu, F.T., Zeng, X.B., 2025. The Discovery of a Paleo-Fluvio-Lacustrine Facies Zircon Deposit on the Northern Margin of the Kubai Basin in Xinjiang Represents a Breakthrough in the Exploration of Zircon Deposits in China. *Earth Science*, 50(6): 2452-2456 (In Chinese with English Abstract).
- 刘春花, 吴才来, 郜源红, 雷敏, 秦海鹏, 李名则, 2014. 南天山拜城县波孜果尔 A 型花岗岩类锆石 U-Pb 定年及其 Lu-Hf 同位素组成. *岩石学报*, 30(6): 1595-1614.
- Liu, C.H., Wu, C.L., Gao, Y.H., Lei, M., Qin, H.P., Li, M.Z., 2014. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Lu-Hf isotopic system of A-type granitoids in South Tianshan, Baicheng County, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1595-1614 (In Chinese with English Abstract).
- 罗彦军, 王斌, 王国灿, 陈博, 张海迪, 马伯永, 2025. 西南天山下泥盆统阿帕达尔坎组砂岩物源及构造环境. *地球科学*, 50(7): 2759-2774.
- Luo, Y.J., Wang, B., Wang, G.C., Chen, B., Zhang, H.D., Ma, B.Y., 2025. Provenance and Tectonic Environment of Lower Devonian Apadalkan Formation in Southwest Tianshan. *Earth Science*, 50(7): 2759-2774. (In Chinese with English Abstract).
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. *科学通报*, 49(16): 1589-1604.
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin* 49, 1554-1569.
- 杨利荣, 邹宁, 岳乐平, 郭怀军, 2017. 库布齐沙漠碎屑锆石 U-Pb 年龄组成及其物源分析. *第四纪研究*, 37(3): 560-569.

- Yang, L.R., Zou, N., Yue, L.P., Guo, H.J., 2017. Distribution of U-Pb ages of detrital zircon from the Hobq desert and its implications for provenance. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(3): 560-569 (In Chinese with English Abstract).
- 张玲, 杨晓平, 万景林, 郑德文, 2018. 中新生代南北天山差异性抬升历史的磷灰石裂变径迹证据. *岩石学报*, 34(3): 837-850.
- Zhang, L., Yang, X.P., Wan, J.L., Zheng, D.W., 2018. Mesozoic and Cenozoic differential uplifting history of the North Tianshan and the South Tianshan from apatite fission-track date. *Acta Petrologica Sinica*, 34(3): 837-850 (In Chinese with English Abstract).
- 赵佳琦, 程晓敢, 陈维力, 张鹏, 潘杨勇, 陈龙, 肖文, 范坤宇, 魏疆宁, 2026. 库车坳陷克拉苏构造带中段盐下逆掩推覆带特征与数值模拟. *地球科学*, 51(1): 317-328.
- Zhao, J.Q., Cheng, X.G., Chen, W.L., Zhang, P., Pan, Y.Y., Chen, L., Xiao, W., Fan, K.Y., Wei, J.N., 2026. Characteristics and Numerical Simulation Analysis of Subsalt Overthrust Belts in Middle Kelasu Structural Belt, Kuqa Depression. *Earth Science*, 51(1): 317-328. (In Chinese with English Abstract).
- 朱如凯, 高志勇, 郭宏莉, 韩丹, 张丽娟, 孙玉善, 程明. 2007. 塔里木盆地北部白垩系-古近系不同段、带沉积体系比较研究. *沉积学报*, 25(3): 325-331.
- Zhu, R.K., Gao, Z.Y., Guo, H.L., Han, D., Zhang, L.J., Sun, Y.S., Cheng, M., 2007. Comparative of different segmentations and zones during Cretaceous and Paleogene in north Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(3): 325-331 (In Chinese with English Abstract).